

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA SOLUÇÃO DE REFORÇO SÍSMICO DE PAREDES DE ALVENARIA DE ADOBE

António Figueiredo; Humberto Varum; Aníbal Costa

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, PORTUGAL
e-mail: ajfigueiredo@ua.pt; hvarum@ua.pt; agc@ua.pt
Tel.: +351 234 370049 - Fax: +351 234 370094

Patrimonio Edificado en Tierra. Catalogación / Conservación / Técnicas

construção em terra, adobe, comportamento cíclico, reforço sísmico.

1.- Resumo

Em Portugal e sobretudo na zona litoral centro, particularmente no distrito de Aveiro uma elevada fracção dos edifícios construídos até meados do século XX foi realizada em alvenaria de adobe. Actualmente, devido à perda do conhecimento empírico sobre os materiais e técnicas construtivas adequadas a este tipo de estruturas, têm-se verificado intervenções inadequadas para este tipo de alvenarias.

Recentemente, na Universidade de Aveiro foi construído um modelo de parede de adobe com geometria em planta em forma de I, à escala real. Este modelo foi ensaiado até à rotura sob a acção de cargas verticais constantes, para simular as acções permanentes e sobrecargas que afectam as construções, combinadas com a aplicação de cargas horizontais cíclicas de amplitude crescente, para simular o efeito da acção dos sismos. Este ensaio teve como principal objectivo avaliar a vulnerabilidade sísmica deste tipo de estruturas. Após o ensaio da parede no seu estado original, repararam-se os danos provocados e procedeu-se ao seu reforço com recurso a uma rede sintética devidamente ancorada e tensionada, embebida na argamassa de reboco da parede. Após a reparação e reforço da parede, esta foi submetida a um novo ensaio cíclico, com o objectivo de avaliar a viabilidade da reabilitação e reforço sísmico destas construções em alvenaria de adobe. Os resultados alcançados com os ensaios nos dois modelos (antes e após o reforço) permitem desta forma, compreender o comportamento destas construções existentes sob cargas cíclicas, suportar o desenvolvimento e calibração de novos modelos numéricos, uma avaliação mais rigorosa da segurança estrutural para estas alvenarias e suportar a recomendação de soluções de reforço comprovadas. Verificou-se que as técnicas de reabilitação e reforço utilizadas poderão ser aplicadas no reforço sísmico das construções existentes de alvenaria de adobe, largamente existentes no património da região e do mundo.

2.- Enquadramento geral

Em Portugal Continental, sobretudo na região litoral centro, e particularmente em Aveiro, pode encontrar-se um vasto património construído em alvenaria de adobe. Uma percentagem significativa de edifícios construídos em adobe tem sobrevivido ao longo dos tempos, continuando actualmente a oferecer aos seus habitantes e utilizadores as condições de conforto e habitabilidade exigidas. Devido à perda do conhecimento empírico sobre os materiais e as técnicas adequadas para este tipo de construções em alvenaria de adobe tem, em muitos casos, sido aplicadas em intervenções de reabilitação, soluções e materiais que prejudicam o seu desempenho. A não conservação do património existente e as intervenções erróneas em muitos casos, justifica o estado de degradação considerável de uma parte importante destes edifícios. A degradação, conjugada com a elevada

vulnerabilidade sísmica destas estruturas, localizadas em zonas de perigosidade sísmica considerável, justifica a investigação e o desenvolvimento de técnicas de reforço sísmico para estas estruturas. Este tipo de construção apresenta uma resposta muito deficiente às acções horizontais, devido à sua fraca resistência à tracção e ao seu comportamento frágil (Brito e Gomes, 2005).

Têm-se desenvolvido vários estudos, como por exemplo, os realizados por Arêde *et al.*, 2007, Varum *et al.*, 2006, Varum *et al.*, 2005 para colmatar a falta de informação existente, em relação às propriedades das estruturas de adobe e dos seus materiais constituintes, tais como, a composição, resistência e rigidez, ductilidade, capacidade de dissipação de energia e mecanismos de colapso.

3.- Construção de uma parede à escala real de alvenaria de adobe

Construiu-se no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro uma parede com geometria em planta em I, à escala real. Na sua construção utilizaram-se blocos de adobe de dimensões médias de $29 \times 45 \times 12 \text{ cm}^3$ provenientes de uma demolição na zona de Aveiro, e uma argamassa à base de cal hidratada de modo a simular uma construção representativa do vasto património existente no distrito. Foi usado um traço de 1:1:2 (cal hidratada, terra ligeiramente argilosa e areia) para o fabrico da argamassa de assentamento e, posteriormente, de reboco. A parede (Figura 1) tem uma altura de 3,07m, um comprimento de 3,5m e uma espessura média de 0,29m (Pereira, 2008).



a)



b)

Figura 1. - Construção da parede de alvenaria de adobe. a) Início da construção (primeiras fiadas). b) Fase final da construção da parede (antes do reboco).

3.1.- Evolução dos ensaios da parede original e resultados obtidos

A parede original foi ensaiada sob a acção de uma força horizontal cíclica de amplitude crescente, aplicada a 2,5m de altura em relação à primeira fiada de adobes (Figura 2) até à sua rotura. Para a realização do ensaio foi colocada uma carga vertical uniformemente distribuída no topo da parede, correspondente a um valor total de 20kN, de forma a simular as acções permanentes e sobrecargas quase-permanentes típicas para este tipo de construções. A deformação sofrida pela parede, durante o ensaio, foi registada em vários pontos através de transdutores electrónicos colocados em pontos mais representativos da resposta da parede.

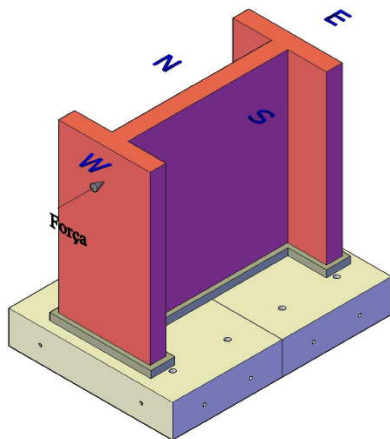


Figura 2. - Esquema do ensaio.

Do ensaio cíclico, obteve-se uma capacidade máxima ao corte de 58kN, para um deslocamento horizontal ao nível do topo da parede de 1mm. Na Figura 3, mostra-se a evolução da força horizontal aplicada com o correspondente deslocamento no ponto de aplicação da força (Pereira, 2008).

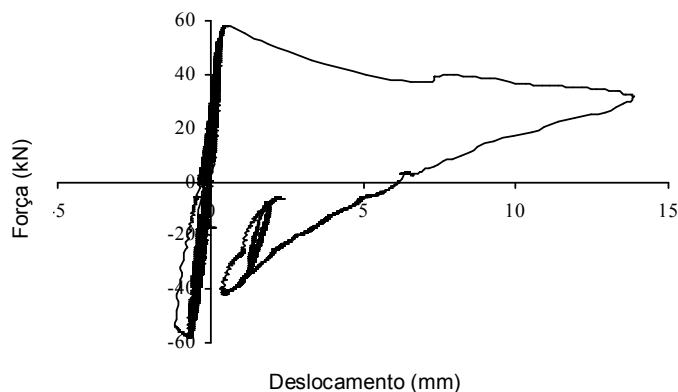


Figura 3. - Força *versus* deslocamento ao nível da aplicação da força (adaptado de Pereira, 2008).

Como se pode observar no gráfico, verificou-se uma resistência residual da parede de aproximadamente 30kN e foi imposto um deslocamento lateral máximo ao nível do ponto de aplicação da força de 13,7mm (Pereira, 2008).

Os ensaios dinâmicos foram realizados através da medição de acelerações por um sismógrafo colocado numa reentrância no topo da parede, de onde se derivam as frequências próprias da parede. Ao fim de cada série de ciclos de deslocamentos impostos à parede era efectuada uma medição da sua frequência natural (Figura 4).

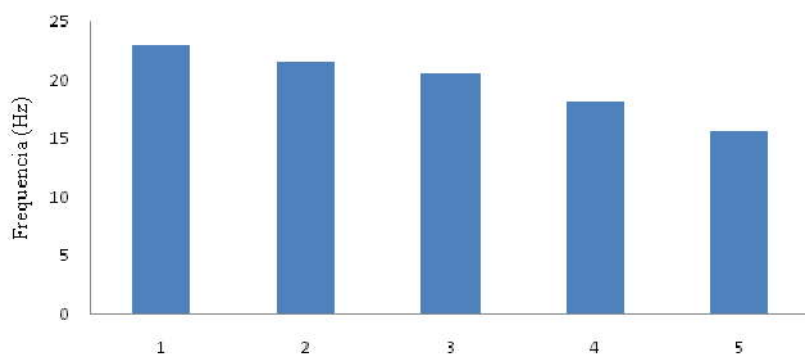


Figura 4. - Evolução das frequências naturais ao longo do ensaio (Pereira, 2008).

Da análise dos resultados em termos de evolução de frequências, observa-se que:

- A primeira frequência natural da parede carregada axialmente é de 22,95 Hz;
- Após os carregamentos cíclicos de 0,1mm e 0,5mm, a frequência caiu para 21,58Hz e 20,51Hz respectivamente;
- Depois de se atingir a resistência máxima da parede, para um deslocamento horizontal de 1mm, a frequência diminuiu para 18,07Hz;
- No fim de todos os ciclos de carga, a frequência volta a cair para um valor final de 15,63Hz.

Em paralelo com os ensaios efectuados sob a parede, testaram-se os provetes de argamassa, com dimensões de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, produzidos durante a sua construção, obtendo-se uma tensão de rotura em compressão média de 0,67MPa. Para a resistência em tracção, os resultados obtidos correspondem a valores de aproximadamente 35% da respectiva resistência à compressão.

3.2.- Ensaios aos materiais utilizados na reabilitação da parede

Com o objectivo de recuperar a resistência original da parede e melhorar a sua ductilidade, foi efectuado um levantamento aos materiais de possível aplicação na reabilitação da parede (apresentado com mais detalhe em Figueiredo, 2009).

De modo a garantir uma solução económica e uma boa compatibilidade com os materiais utilizados na construção original da parede, que representa este tipo de construções tradicionais, definiu-se como solução de reparação, a aplicação de uma goma à base de cal para a selagem das fissuras. Para o seu reforço projectou-se a aplicação de uma rede sintética em toda a sua envolvente.

Para avaliar a eficiência da selagem das fissuras realizaram-se previamente alguns ensaios experimentais de resistência a flexão de blocos de adobe (Figura 5), no seu estado original e após selagem/colagem. Para os blocos originais obteve-se uma tensão de rotura média de 0,54MPa. Em seguida estes blocos foram colados com uma goma à base de cal aérea, cal hidráulica e uma mistura de ambas com a proporção 50%:50%, de modo a averiguar a solução mais eficaz para a selagem das fissuras na parede.

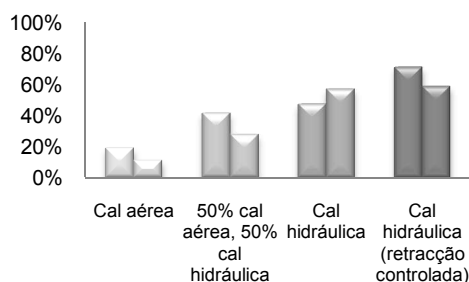
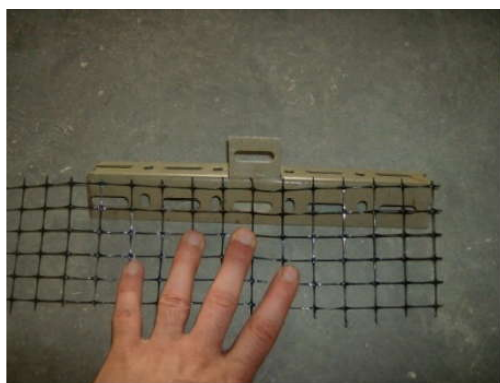


Figura 5. - Esquema do ensaio e resultados das selagens efectuadas.

Como era previsível, para os blocos selados com a goma de cal hidráulica obteve-se uma muito superior eficiência da colagem, se comparada com as outras 2 soluções (Figura 5). Assim, optou-se pela goma de cal hidráulica para a selagem das fissuras na parede.

Devido à rede seleccionada para a reabilitação da parede não possuir uma ficha técnica que contemple as suas características de comportamento mecânico e para estimar a influência, na resposta cíclica, que esta terá na resposta da parede, quando inserida no reboco, avaliou-se experimentalmente o seu comportamento em tracção (Figura 6).



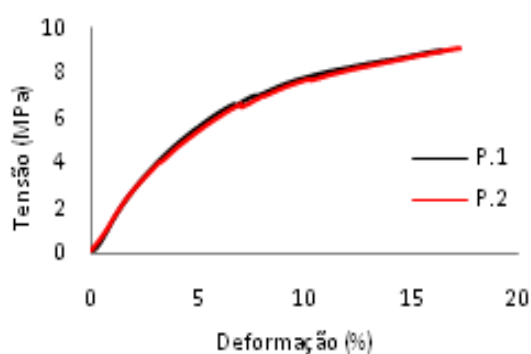
a)



b)



c)



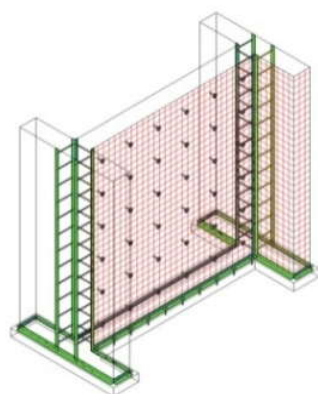
d)

Figura 6. - Ensaio de tracção.
a) Cantoneira de fixação da rede. b) Esquema do ensaio.
c) Modo de rotura observado nas fibras da rede.
d) Resultados obtidos.

Obteve-se assim uma tensão média de rotura à tracção de 9MPa, para uma deformação longitudinal correspondente de 18%.

3.3.- Reparação dos danos e reforço da parede

Após a campanha inicial de ensaios cíclicos sob a parede original, os danos foram reparados pelo preenchimento das fissuras, por injeccção sob pressão de uma goma de cal hidráulica. Após a selagem e injeccção das fissuras procedeu-se à remoção do reboco original para aplicação da solução de reforço. Este, tal como atrás referido, consistiu na aplicação de uma rede sintética em toda a envolvente da parede. A rede foi fixada com recurso a cantoneiras e perfis laminares em PVC “cozidos” entre si com um fio de nylon de alta resistência em todos os vértices côncavos da parede (Figura 7). Para a sua fixação foi ainda efectuada uma pregagem com buchas/pregos plásticos formando uma malha quadrada de pontos de fixação, afastados de 0,5m nas duas direcções (Figura 7).



a)



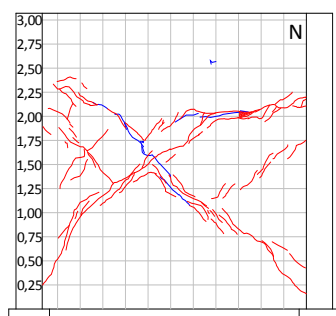
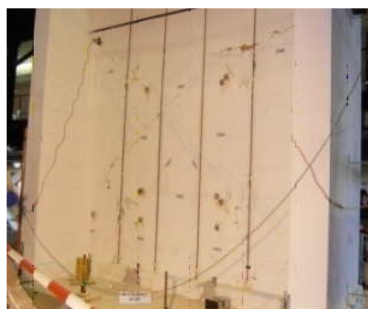
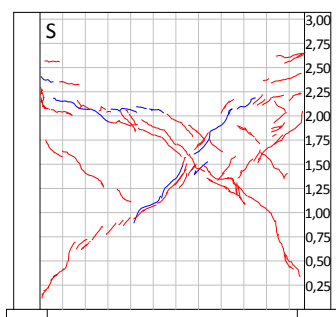
b)

Figura 7. - Reforço da parede.
a) Esquema geral do reforço.
b) Fixação da rede sintética.

3.4.- Ensaio sobre a parede reforçada

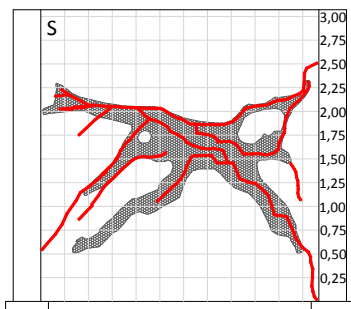
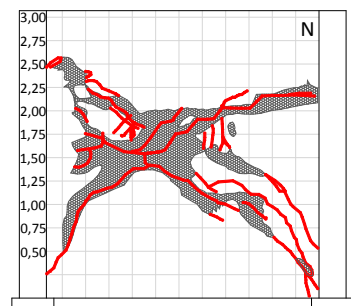
Na execução dos ensaios na parede após o seu reforço, procurou-se manter o mesmo esquema geral de ensaio realizado sobre a parede original, de modo a facilitar a sua comparação.

Com o aumento dos deslocamentos laterais impostos na parede, verificou-se uma evolução dos danos, desde a propagação de pequenas fissuras, até ao destacamento localizado do reboco (Figura 8). A fissuração só se tornou perceptível a partir de um deslocamento lateral correspondente a 5mm. No ciclo sucessivo, de amplitude de deslocamentos impostos de 12,5mm, ocorreu uma acentuação e propagação intensa das fissuras já instaladas. Verificou-se, ainda, a formação de muitas novas fissuras, com aberturas entre os 0,5 e 1,0mm. A seguir, para deslocamentos impostos de 25,0 e 37,5mm, observou-se um destacamento acentuado do reboco em grande parte da área já fissurada. Foi visível também o esmagamento da parede na zona envolvente da ligação desta ao sistema de aplicação da força horizontal. Na Figura 9 pode visualizar-se, o destacamento do reboco durante os últimos ciclos de deslocamentos impostos e as fissuras que se prolongavam até à face oposta da parede.



— $\Delta = 5 \text{ mm}$
— $\Delta = 12,5 \text{ mm}$

Figura 8. - Evolução da fissuração nas faces Norte e Sul.

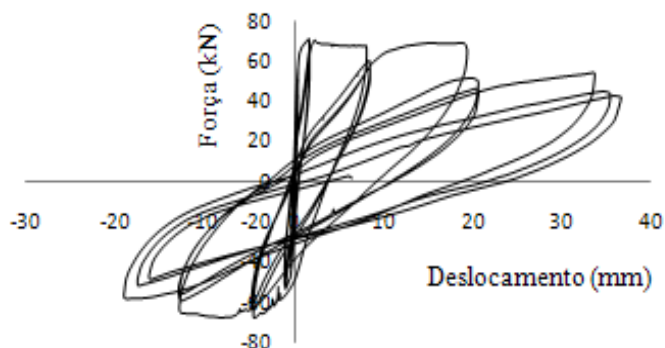


- ▨ Destacamento do reboco
- Fissuras visíveis nos blocos

Figura 9. - Danos observados (estado final) nas faces Norte e Sul da parede.

3.4.1.- Ensaio cíclico

Como resultados do ensaio cíclico, apresenta-se a evolução dos ciclos carga-descarga, impostos à parede nos dois sentidos na direcção do seu próprio plano (Figura 10).



a)

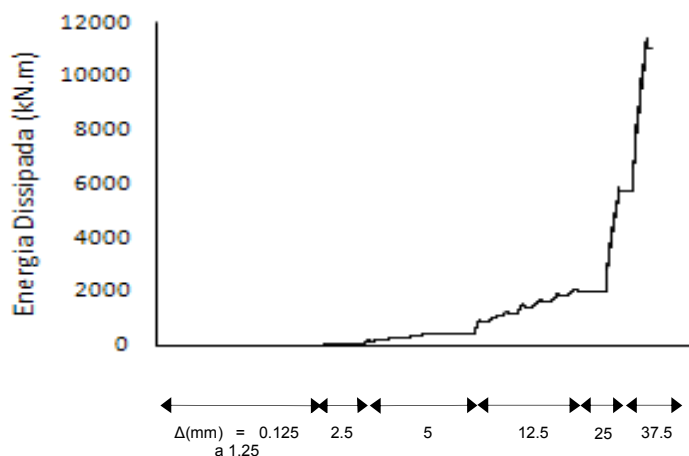


Figura 10. - Evolução do ensaio cíclico. a) Força *versus* deslocamento horizontal. b) Evolução da energia dissipada.

b)

Da análise do gráfico com a evolução da força *versus* deslocamento horizontal, pode-se observar que a capacidade resistente da parede ao corte lateral é de 71,75kN, verificado para um deslocamento da ordem de 1,6 mm. O deslocamento lateral máximo sofrido pela parede durante o ensaio cíclico foi de aproximadamente 40mm. Verificou-se uma resistência residual da parede de 43,47kN, valor correspondente a um decréscimo de 40% da sua resistência máxima. Do gráfico com a evolução da energia dissipada observa-se que só na fase final do ensaio (a partir de um nível de deslocamento lateral de 12,5 mm) é verificada uma significativa dissipação da energia, o que se confirma com os danos observados na parede nos últimos ciclos do ensaio, para níveis de deslocamento imposto superiores.

Com os resultados obtidos dos ensaios cíclicos efectuados na parede nos seus estados original e após reforço, construiu-se um gráfico força *versus* deslocamento com as curvas dos resultados sobrepostas (Figura 11). Esta análise permitiu a obtenção de dados comparativos que permitiram obter melhores conclusões sobre a eficiência do reforço efectuado.

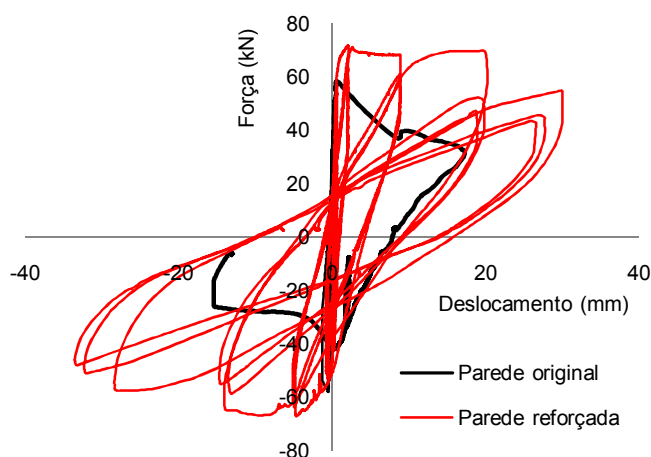


Figura 11. - Força *versus* deslocamento horizontal no topo da parede.

Dos resultados apurados, verifica-se que a parede reforçada adquiriu uma rigidez inicial praticamente igual à da parede original. A sua capacidade máxima ao corte teve um incremento de aproximadamente 25% e o deslocamento lateral máximo imposto foi aproximadamente o dobro do aplicado na parede original. Conclui-se ainda que a fragilidade pós-resistência máxima da parede diminuiu significativamente, aumentando a sua ductilidade e a capacidade de dissipação de energia.

3.4.2.- Ensaio dinâmico

Dos ensaios dinâmicos efectuaram-se várias leituras das frequências próprias da parede antes, durante e após o ensaio cíclico. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 12.

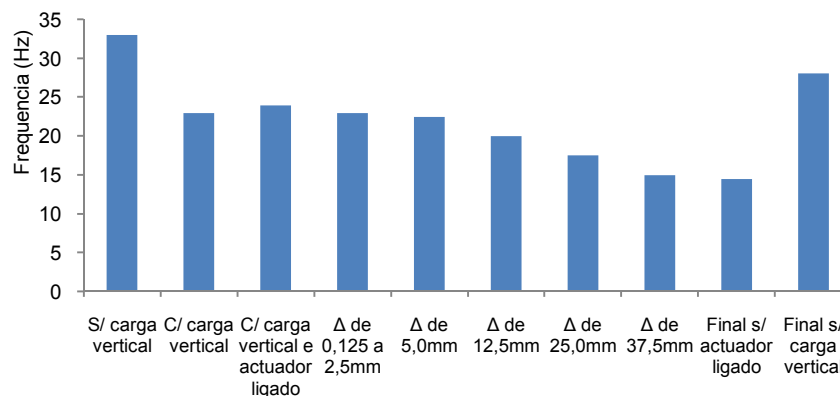


Figura 12. - Evolução das frequências próprias (Hz) da parede.

Da análise comparativa, da evolução das frequências ao longo dos dois ensaios cíclicos, da parede original e após o reforço (ver Figura 13), evidencia-se a diferença de comportamento entre as duas paredes. Salienta-se que, na Figura 13 apresentam-se apenas os resultados das frequências para as paredes com a carga adicional vertical aplicada.

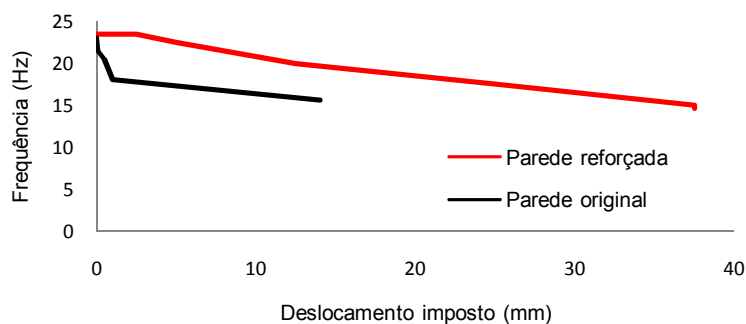


Figura 13. - Evolução das frequências próprias da parede reforçada e da parede original.

Da análise das frequências próprias das paredes observadas no gráfico da Figura 13, verifica-se que a reparação da parede lhe conferiu uma rigidez inicial praticamente igual à da parede original. Durante a imposição de cargas cíclicas na parede reforçada, observou-se que a frequência sofre um decréscimo de rigidez e consequentemente de frequência natural, associado ao dano instalado, mais suave.

3.4.3.- Ensaio de flexão e compressão em provetes de argamassa

Dos provetes da argamassa usada na injeção das fissuras obteve-se um valor médio de resistência em compressão de 3,77MPa, sendo a tensão de rotura por tracção em flexão de aproximadamente 30% desse valor. Para os provetes da argamassa usada no reboco da parede reforçada observou-se uma resistência em compressão de 0,61MPa e 0,20MPa de resistência em tracção, que corresponde também a cerca de 30% da sua resistência em compressão.

4.- Conclusões e comentários finais

Com este trabalho de investigação contribuiu-se para a compreensão do comportamento de estruturas em alvenaria de adobe, quando sujeitas a solicitações cíclicas, como as induzidas pelos sismos. Deste modo, foi possível caracterizar a evolução da curva força-deslocamento, deformação máxima admissível, bem como os modos de rotura correspondentes para a parede de alvenaria de adobe estudada. Após a primeira série de ensaios cíclicos de caracterização do comportamento da parede, estudou-se uma solução de reforço sísmico.

A execução dos trabalhos de reparação e reforço da parede em laboratório permitiu um controlo rigoroso dos materiais e técnicas utilizadas na construção da própria parede e no seu reforço. Foram efectuados ensaios aos materiais utilizados.

Dos resultados do ensaio sob a parede reparada e reforçada, constatou-se a recuperação da rigidez inicial, um ligeiro aumento da resistência lateral, um significativo aumento da ductilidade e da capacidade de dissipação de energia e não se verificou um modo de rotura frágil, característico deste tipo de alvenarias. Com o melhoramento de comportamento verificado com as soluções de reparação e reforço adoptadas, conseguir-se-á diminuir a vulnerabilidade sísmica das construções de adobe. Ou seja, a solução de reparação das fissuras adoptada (injecção de goma de cal hidráulica) combinada com a solução de reforço (reboco com rede *Cintoflex* incorporada, devidamente esticada e ancorada) mostrou-se muito eficaz.

Os resultados obtidos com os ensaios da parede, no seu estado original e após o reforço, possibilitam o estabelecimento de uma base de conhecimentos que permite, a interpretação de patologias estruturais típicas, a calibração de modelos numéricos com vista a uma melhor descrição do comportamento das construções e uma avaliação mais rigorosa da segurança das construções existentes em alvenaria de adobe, importante património regional, nacional e mundial.

Em suma, verificou-se que as soluções de reabilitação estudadas revelaram-se viáveis para possíveis aplicações no reforço de construções de adobe em zonas sísmicas.

Bibliografia

ARÊDE, A.; COSTA, A.; VARUM, H.; VICENTE, R.; COSTA, A.; PEREIRA, H.; y RODRIGUES, H. *Avaliação experimental do comportamento fora do plano de paredes de alvenaria de adobe*. V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 10-13 de Outubro de 2007.

BRITO, J.; y GOMES, M. I. *Sismo-Reforço de Construções de Terra Crua*. Terra em Seminário – IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 1st ed. Lisboa. Argumentum, ISBN 972-8479-37-9, 2005.

FIGUEIREDO, A. *Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

PEREIRA, H. *Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Departamento de Eng. Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

VARUM, H.; COSTA, A.; PEREIRA, H.; ALMEIDA, J.; y RODRIGUES, H. *Avaliação Experimental do Comportamento Estrutural de Elementos Resistentes em Alvenaria de Adobe*. Departamento de Eng. Civil. Universidade de Aveiro. Portugal, 2006.

VARUM, H.; MARTINS, T.; y VELOSA, A. *Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro*. IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal. Convento da Orada. Monsaraz, 8 a 10 de Outubro de 2005.